

Patent Abstracts of Japan

PUBLICATION NUMBER : 09291337
PUBLICATION DATE : 11-11-97

APPLICATION DATE : 24-04-96
APPLICATION NUMBER : 08129044

APPLICANT : AICHI STEEL WORKS LTD;

INVENTOR : MUROGA HIROSHI;

INT.CL. : C22C 38/00 C21D 6/00 C22C 38/58

TITLE : BEARING STEEL FOR INDUCTION HARDENING

ABSTRACT : PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a bearing steel applicable to bearing parts to be subjected to high pressure and requiring excellent wear resistance and capable of giving superior rolling fatigue characteristic by means of induction hardening.

SOLUTION: This steel is a bearing steel for induction hardening, excellent in rolling fatigue characteristic, which has a composition consisting of, by weight ratio, 0.51-0.65% C, 0.70-1.60% Si, 1.30-2.0% Mn, $\leq 0.025\%$ P, $\leq 0.030\%$ S, 0.50-1.50% Ni, 0.10-0.50% Cr, $\leq 15\text{ppm}$ O, $\leq 30\text{ppm}$ Ti, and the balance Fe with impurity elements and is subjected to induction hardening of 900-1,100°C surface temp. Further, Mo can be added by $\leq 0.50\%$ in order to improve rolling fatigue characteristic to a greater extent.

COPYRIGHT: (C)1997,JPO

THIS PAGE BLANK (USPTO)

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平9-291337

(43) 公開日 平成9年(1997)11月11日

(51) Int.Cl. ⁸	識別記号	序内整理番号	F I	技術表示箇所
C 2 2 C 38/00	3 0 1		C 2 2 C 38/00	3 0 1 A
C 2 1 D 6/00			C 2 1 D 6/00	K
C 2 2 C 38/58			C 2 2 C 38/58	

審査請求 未請求 請求項の数 2 F D (全 6 頁)

(21) 出願番号	特願平8-129044	(71) 出願人	000116655 愛知製鋼株式会社 愛知県東海市荒尾町ワノ割1番地
(22) 出願日	平成8年(1996)4月24日	(72) 発明者	西川 友章 愛知県東海市荒尾町ワノ割1番地 愛知製 鋼株式会社内
		(72) 発明者	松下 雅史 愛知県東海市荒尾町ワノ割1番地 愛知製 鋼株式会社内
		(72) 発明者	室賀 啓 愛知県東海市荒尾町ワノ割1番地 愛知製 鋼株式会社内

(54) 【発明の名称】 高周波焼入用軸受鋼

(57) 【要約】

【課題】 高い圧力が負荷され、優れた耐摩耗性が要求される軸受部品の適用に適し、高周波焼入によって優れた転動疲労性が得られる軸受鋼を提供する。

【解決手段】 重量比にしてC:0.51~0.65%、Si:0.70~1.60%、Mn:1.30~2.0%、P:0.025%以下、S:0.030%以下、Ni:0.50~1.50%、Cr:0.10~0.50%、さらに0.15ppm以下、Ti:30ppm以下を含有し、残部がFe及び不純物元素から成り、表面温度が900~1100℃となる高周波焼入を施すことを特徴とする転動疲労性に優れた高周波焼入用軸受鋼である。また、転動疲労性をさらに改善するために、Moを0.50%以下の範囲で添加しても良い。

【特許請求の範囲】

【請求項1】 重量比にしてC:0.51~0.65%、Si:0.70~1.60%、Mn:1.30~2.00%、P:0.025%以下、S:0.030%以下、Ni:0.50~1.50%、Cr:0.10~0.50%を含有し、さらに0:15ppm以下、Ti:30ppm以下を含有し、残部がFe及び不純物元素から成り、表面温度が900~1100℃となる高周波焼入を施すことを特徴とする転動疲労性に優れた高周波焼入用軸受鋼。

【請求項2】 重量比にしてC:0.51~0.65%、Si:0.70~1.60%、Mn:1.30~2.0%、P:0.025%以下、S:0.030%以下、Ni:0.50~1.50%、Cr:0.10~0.50%とMo:0.50%以下を含有し、さらに0:15ppm以下、Ti:30ppm以下を含有し、残部がFe及び不純物元素から成り、表面温度が900~1100℃となる高周波焼入を施すことを特徴とする、転動疲労性に優れた高周波焼入用軸受鋼。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、転動部品の軌道部、転動体等に用いられる軸受鋼に関し、特に、高周波焼入によって優れた転動疲労性が得られる軸受鋼に関する。

【0002】

【従来の技術】軸受部品は自動車をはじめとする機械の性能を左右する重要な要素部品であり、高い圧力が負荷され、隣接する部品と高速度に摺動した状態で使用されるため、従来よりその転動疲労性の向上が強く求められている。

【0003】また、軸受部品には使用中に摩耗によって寸法が変化しないように、優れた耐摩耗性を確保する必要があり、かつ優れた転動疲労性を得る必要があるため、高い表面硬さとする必要がある。従って、優れた耐摩耗性を得るために単なる焼入だけでなく、浸炭焼入などの表面硬化処理を施されている場合がある。

【0004】しかしながら、浸炭はその処理に長い時間を必要とするため、エネルギー消費量が多く、必ずしも効率的、経済的な処理とは言えない。また、浸炭焼入で発生する大きな歪は寸法精度の厳しい部品においてしばしば問題となり、さらに、大型部品では必要とする焼入性を確保するために合金元素を多量に添加しなければならず、材料コストの上昇が避けられない。

【0005】それに対し、高周波焼入は非常に短時間で表面硬化処理が可能であり、焼入歪も浸炭焼入に比べ著しく小さく抑えることができる。また、高周波焼入は中心部が加熱されていないために焼入時に中心部からの復熱がなく、全体を加熱しずば焼入する場合に比べ冷却速度を高めることができるため、同一鋼種において使用できる部品寸法の範囲が広く、寸法が大きくても焼入性向上のために合金元素の添加量が少なくすむという利点がある。

【0006】以上のように高周波焼入には多くの利点が

あるため広く利用されており、従来高周波焼入を行って使用する軸受部品には、JISのS53CやS53CのMn量を高めた0.5C-0.25Si-1.5Mn-0.2Cr 鋼等が使用されていた。

【0007】また、疲労強度の優れた高周波焼入鋼材としては、今までに複数の特許出願がされており、例えば特開昭62-96647号あるいは特開平6-81077号などが開示されている。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】前記した JISのS53Cや0.5C-0.25Si-1.5Mn-0.2Cr 鋼は、高周波焼入により表面硬さをHv 700程度と十分な硬さを得ることができるが、軸受部品として最も重要な特性である転動疲労性については、最近のユーザーからの厳しい要求に対応できるレベルには達していない。

【0009】また、特開昭62-96647号に開示された機械構造用部品は、疲労強度のうち歯車の歯元等に要求される曲げ疲れ強さについては詳細に検討され、従来鋼に比べ優れた強度の得られることが開示されているが、転動疲労性については何ら考慮されていない。

【0010】また、特開平6-81077号に開示された高強度高周波焼入用鋼は、軸受鋼としての使用を最重点に設計された鋼ではなく、冷間鍛造性を重視しているために軸受鋼として必要な高い硬度が得られない場合があり、軸受部品として使用した時にユーザーの厳しい要求に満足できる優れた転動疲労性が得られないという問題がある。

【0011】通常焼入や浸炭焼入は高硬度な表面硬さを得るのに有効な場合もあるが、省エネルギー、焼入歪低減のためには、高周波焼入の方が有利である。また、通常焼入では内部まで硬さが高いため、耐衝撃性が劣るという欠点がある。このため高周波焼入用鋼は様々な用途でその適用が検討されているが、転動疲労性に関し、ユーザーの厳しい要求を満足できる高周波焼入用軸受鋼に関しては、十分に検討されていないのが現状である。一方、通常焼入、浸炭焼入鋼で転動疲労性に優れた鋼として特開平4-349号、特開平4-143253号等が開示されているが、これらの鋼も焼入歪発生の問題に関しては例外ではなく、また高周波焼入した場合に優れた転動疲労性の得られる鋼の提供が強く望まれていた。

【0012】本発明はこのような課題を解決するために成されたものであり、その目的とするところは、高周波焼入処理により従来鋼に比べ優れた転動疲労性を得ることのできる軸受用鋼を提供することにある。

【0013】

【課題を解決するための手段】本発明者等は、高周波焼入処理を行う場合における転動疲労性を改善できる軸受鋼の成分系について鋭意研究を行った結果、表面硬さはS53C又はS53C+Mn 増量材と同等であっても、Siを脱酸処理で必要となる添加量を超えて積極添加し、かつNiも同時に添加した場合において、優れた転動疲労性の得られ

ることを見出したものである。また、Si、Niの複合添加に加え、Moを適量添加することによって、さらに優れた転動疲労性を得ることができる。

【0014】さらに、軸受部品のように極めて高い圧力が負荷され、かつ隣接部品と高速度で摺動した状態で使用される場合には、介在物低減対策が必須であり、そのためにTi、Oを極力低減して、Ti系、酸化物系介在物を低減している。その結果、介在物起点により起きる材料表面の剥離による破壊現象の発生を防止し、転動疲労性の改善を図ることができる。

【0015】以上説明した新しい知見により成された本発明の転動疲労性に優れた高周波焼入用軸受鋼は、重量比にしてC:0.51~0.65%、Si:0.70~1.60%、Mn:1.30~2.00%、P:0.025%以下、S:0.030%以下、Ni:0.50~1.50%、Cr:0.10~0.50%を含有し、さらに、O:15ppm以下、Ti:30ppm以下を含有し、残部がFe及び不純物元素から成り、表面温度が900~1100℃となる高周波焼入を施すことを特徴とするものであり、転動疲労性をさらに改善したい場合には、必要に応じて前記鋼にMoを0.50%以下の範囲内で追加添加してもよい。

【0016】次に本発明の転動疲労性に優れた高周波焼入用軸受鋼の化学成分、高周波焼入条件の限定理由について以下に説明する。

【0017】C:0.51~0.65%

高周波焼入において軸受鋼としての使用に支障がない高硬度を維持し、焼入むらの原因となるフェライトの生成を抑制するためには、0.51%以上のCを含有させることが必要である。しかし、多量に含有させると焼割れが発生する可能性が高くなるので、上限を0.65%とした。焼割れ防止の観点からはCの上限を0.60%にすることが望ましい。

【0018】Si:0.70~1.60%

従来鋼においてもSiは脱酸処理のために添加されているが、脱酸処理が可能であれば良いので、例えばS53Cでは最大でも0.35%となっている。それに対し、本発明では、転動疲労性を高めるためにSiを脱酸に必要な量を越えて添加するものであり、下限を0.70%とした。しかしながら、多量に含有させても効果が飽和してしまうばかりでなく、著しく加工性が低下するため、上限を1.60%とした。

【0019】Mn:1.30~2.00%

Mnは、焼入性を向上させ、高周波焼入後に軸受鋼として必要な硬さを確保するために必要であるとともに、フェライトの生成を抑制し転動疲労性を改善する効果を有する元素である。前記効果を十分に得るためには、1.30%以上含有することが必要である。しかしながら、多量に添加すると熱間加工性が低下し、熱間圧延が難しくなるとともに、鋼材に結状偏析を生じやすくなり、焼入むらを助長するため、上限を2.00%とした。より好ましくは上限を1.70%とするのが良い。

【0020】P:0.025%以下

Pは製造上不純物としての含有が避けられない元素であるが、粒界に偏析しやすく、耐衝撃性や転動疲労性を低下させるので、製造上の可能な範囲で極力低減することが必要であり、上限を0.025%とした。

【0021】S:0.030%以下

SはMnと結合して、鋼に非溶性で極めて変形能の高いMnSを形成する。鋼中に存在するMnSが切削加工時の切削抵抗及び工具摩耗等を低減することにより、鋼の被削性を向上させる。しかし、このMnSは表面の剥離破壊の起点となり、転動疲労性を低下させるため、本発明ではSの上限を0.030%とした。なお、MnSの影響を皆無とし、より良好な転動疲労性を得るためには、上限を0.010%とすることが望ましい。

【0022】Ni:0.50~1.50%

NiはSiと同様に、焼入組織を強化し、転動疲労性を改善する効果を有するため、本発明にとって最も重要な元素である。また、前述したSi添加による効果との複合効果によって大きく転動疲労性を改善することができる。従って、前記効果を得るために、最低でも0.50%含有させるものとした。ただし、多量に含有させると、前記効果が飽和するとともに、コスト面で不利となるので、上限を1.50%とした。

【0023】Cr:0.10~0.50%

Crは、高周波焼入によって必要な高硬度を得るために効果のある元素であり、0.10%以上の含有が必要である。しかしながら、多量に含有させるとCr系の比較的大きな炭化物を生成し、短時間加熱である高周波焼入時にその炭化物が十分固溶しなくなり、結果として焼入が不十分になる可能性があるため、上限を0.50%とした。好ましくは上限を0.30%とするのが良い。

【0024】Ti:30ppm以下

Tiは鋼中に不純物として含有するNと結合して窒化物を形成し、これが鋼中に大型の介在物となって存在する。このTiNは表面の剥離破壊の起点となりやすく、転動疲労性を低下させる原因となるので、Tiの上限を30ppmとした。

【0025】O:15ppm以下

Oは溶解時に大気中から不純物として混入し、その一部は Al_2O_3 あるいは SiO_2 等の酸化物系介在物として鋼中に存在し、表面の剥離破壊の起点となりやすく、転動疲労性を低下させる原因となる。従って、転動疲労性を最重視する本発明ではその上限を15ppmに規制した。

【0026】Mo:0.50%以下

MoはSiとNiの複合添加に加えて添加することにより、転動疲労性をさらに向上させる効果のある元素である。従って、必要に応じ適量添加することにより効果的に転動疲労性を向上させることができる。但し、Mo添加による効果を十分に得るためには、0.05%以上含有させることが好ましい。しかしながら、多量に含有させても前記効

果が飽和し、かつ鋼中に形成されるMo炭化物が短時間の高周波加熱では十分に固溶させることが難しくなるので、添加量の上限を0.50%とした。好ましくは上限を0.30%とするのが良い。

【0027】高周波焼入時の表面温度：900～1100℃
高周波焼入時の表面温度の下限を900℃としたのは、900℃未満では短時間加熱となるためにパーライト中の炭化物が十分に固溶せず、焼入が不完全となる可能性があるためである。好ましくは表面温度の下限を950℃とするのが良い。また、表面温度が1100℃を越えると焼入の

冷却途中に発生する変態応力、熱応力が大きくなって焼き割れが生じやすくなるため、上限を1100℃とした。好ましくは上限を1050℃とするのが良い。

【0028】

【発明の実施の形態】次に、本発明鋼の特徴を比較鋼、従来鋼と対比して、実施例により説明する。表1にこれらの供試鋼の化学成分を示す。

【0029】

【表1】

区 分	鋼記号	化 学 成 分 (重量%, O, Tiはppm)										
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	O	Ti
第1発明	A	0.53	0.79	1.48	0.012	0.009	0.07	0.51	0.30	0.01	12	21
	B	0.57	1.51	1.82	0.019	0.013	0.07	0.62	0.26	0.01	10	19
	C	0.63	1.35	1.56	0.018	0.005	0.10	0.70	0.22	0.01	10	18
	D	0.60	1.12	1.39	0.021	0.006	0.09	1.25	0.39	0.01	7	20
	E	0.55	1.20	1.77	0.015	0.008	0.09	1.41	0.43	0.01	9	22
	F	0.60	0.95	1.53	0.018	0.024	0.11	1.11	0.20	0.01	11	24
第2発明	G	0.58	1.04	1.68	0.020	0.007	0.09	1.02	0.18	0.28	8	18
	H	0.56	0.83	1.44	0.018	0.009	0.08	0.87	0.24	0.41	8	19
比較鋼	I	0.70	0.98	1.60	0.017	0.008	0.10	0.91	0.25	0.01	10	21
	J	0.46	0.83	1.47	0.020	0.012	0.10	0.96	0.21	0.19	10	19
	K	0.56	0.51	1.71	0.022	0.010	0.08	0.80	0.30	0.02	9	22
	L	0.59	1.19	1.38	0.018	0.009	0.09	0.24	0.19	0.01	11	19
	M	0.60	0.86	1.53	0.016	0.034	0.11	1.10	0.28	0.01	13	24
	N	0.54	0.85	0.92	0.019	0.012	0.10	0.87	0.21	0.01	12	19
	O	0.59	0.91	1.45	0.033	0.019	0.11	0.76	0.18	0.01	11	18
	P	0.57	1.10	1.55	0.020	0.011	0.09	1.03	0.25	0.02	19	38
	Q	0.38	0.72	1.01	0.018	0.009	0.10	0.05	0.35	0.01	18	35
従来鋼	R	0.53	0.26	0.72	0.021	0.020	0.03	0.01	0.08	0.01	15	26
	S	0.53	0.28	1.50	0.019	0.019	0.02	0.02	0.20	0.01	12	20

【0030】表1において、A～H鋼は本発明鋼であり、A～F鋼は第1発明、G、H鋼は第2発明に該当する実施例である。I～Q鋼はいずれかの成分が本発明で規定する範囲を外れている比較鋼である。また、R、S鋼は従来鋼であるS53C及びS53CのMnを増量した鋼である。

【0031】これら各供試鋼について、高周波焼入時の表面温度の測定、焼割れの有無の確認、表面硬さ測定、および、スラスト型転動疲労寿命試験を実施した。なお、表面硬さ測定とスラスト型転動疲労寿命試験は、前記供試材について高周波焼入処理又は通常焼入処理後に150℃にて焼もどし処理を施すことにより準備した試験

片を用いて実施した。以下に各試験方法について説明する。

【0032】なお、従来鋼であるS鋼について通常焼入による試験を行ったのは、高周波焼入処理（中心部は焼入前の組織、硬さのまま）と通常焼入（中心部まで焼入組織となり高硬度）という熱処理の違いによる転動疲労寿命への影響を確認するためである。

【0033】(1)高周波焼入前の熱処理条件
本発明鋼、比較鋼および従来鋼の全ての供試材について、810℃に加熱し、分間温度を保持した後、810～600℃までを30℃/hrの速度で徐冷し、その後空冷するという条件で焼なましを実施した。熱処理後のミクロ組織

は全てバーライトまたはフェライト+バーライトのいずれかとなっていた。

【0034】(2) 高周波焼入条件

高周波焼入は100kHzで所定の温度に10秒以内で加熱し、即座に急冷した。

【0035】(3) 焼割れの有無の確認方法

焼割れの有無は、高周波焼入れ処理後に表面を目視し、さらに断面を鏡面研磨し、顕微鏡観察を行うことによって確認した。表3には焼割れの発生が確認されたものを×、焼割れの発生しなかったものを○で示した。

【0036】(4) 硬さ測定条件

高周波焼入後の表面硬さは、焼入表面から0.5mmの位置でビッカース硬さ(荷重10kg)を測定、その数値をHRCに換算した。

【0037】(5) 転動疲労寿命試験

供試材の鍛伸垂直方向より円盤状の試験片を採取し、上記条件で高周波焼入、焼もどしを実施した後、応力5200N/mm²となるスラスト荷重を負荷して転動疲労寿命試験を行なった。表2に試験条件を示す。各供試鋼毎に10枚の試験片について転動疲労寿命試験を行い、表面のボール軌道部に剥離(ピッチング)が生じるまでの転動回数を測定し、この10個のデータより統計処理を行い、10%累積破損回数(L₁₀)を転動疲労寿命とした。

【0038】以上説明した方法で行った試験結果を表3に示す。なお、表3の寿命試験結果は、従来鋼であるS鋼を高周波焼入処理した場合に得られる寿命を1とした場合の寿命比で示したものである。

【0039】

【表2】

潤滑油	マシン油10
鋼球	3/8インチ×3個
回転数	1000rpm(1500cpm)

【0040】

【表3】

区分	試験No	鋼記号	焼入温度(℃)	焼割れの有無	表面硬さ(HRC)	寿命比(L ₁₀)
第1発明	1	A	980	○	61.5	12.0
	2	B	1060	○	61.6	16.2
	3	C	940	○	62.0	20.4
	4	D	1050	○	61.2	25.1
	5	E	1030	○	61.8	15.9
	6	F	1000	○	61.0	15.3
第2発明	7	G	990	○	61.9	27.7
	8	H	1020	○	62.0	27.9
比較例	9	I	1030	×	—	—
	10	J	980	○	59.0	0.8
	11	K	970	○	61.8	8.0
	12	L	970	○	61.8	3.5
	13	M	990	○	61.2	2.4
	14	N	1000	○	61.3	7.5
	15	O	1010	○	61.6	4.3
	16	P	1030	○	61.6	1.8
	17	Q	1000	○	54.0	0.8
	18	G	850	○	59.7	7.8
	19	G	1140	×	—	—
	20	R	1000	○	61.3	0.7
	21	S	1000	○	61.5	1.0
	22	S	850	○	61.3	0.6

【0041】表3から明らかなように、比較鋼I(試験No.9)はC含有率が高いため、焼割れが発生し、寿命試験ができなかったものであり、比較鋼J(試験No.10)はC含有率が低いため、表面硬さが低下し、従来鋼と同程度の転動疲労寿命しか得られなかったものであり、比較鋼K、L(試験No.11,12)はSi、Ni含有率のいずれか一方が低いため、Si、Niの複合添加による効果が十分に得られず、転動疲労性が劣るものであり、比較鋼M(試験No.13)はS含有率が高いため、剥離寿命の起点となる非金属介在物MnSが多く存在し、転動疲労性が劣るものであり、比較鋼N(試験No.14)は、Mn含有率が低いため、本発明に比べ転動疲労性が若干劣るものであり、比較鋼O(試験No.15)は、P含有率が高いため、Pの粒界偏析により転動疲労性が劣るものである。

【0042】次に、比較鋼P、Q(試験No.16,17)は、Ti、O含有率の影響を調べるために供試材として準備し、試験を行ったものである。このうち、P鋼はTi、O量のみが多い比較鋼、Q鋼はTi、O量が多いことに加え、C、Ni量の少ない比較鋼である。表3から明らかなように、Ti、O量の多いP鋼は、転動疲労性が劣るもの

であり、Ti、U 量の低減による効果が非常に大きいことがわかる。また、Q鋼のようにC、Ni含有率も低い場合には、必要な表面硬さも得られず、従来鋼であるS53C+Mn 添加鋼に比べても劣るものである。

【0043】また、試験No.18,19は、成分範囲が本発明の条件を満たすG鋼を用い、高周波焼入温度を変化させて、その影響を調べたものである。表3に示した結果から明らかなように、試験No.18 は、表面硬さが低くなり転動疲労性が低下している。これは、高周波焼入のように短時間加熱では、温度が低いと炭化物が十分に固溶せず、焼入が不完全となったためと推定される。一方No.19 鋼は逆に温度を高くしすぎて焼割れが生じたものである。

【0044】また、試験No.20,21は従来鋼であるS53C及びS53C+Mn 増量材を高周波焼入したものであるが、著しく寿命が劣るものである。なお、S53C+Mn 増量材(S鋼)について、通常焼入と高周波焼入という熱処理方法の違いによる寿命への影響を調べるために行った試験No.22 は、高周波加熱とは異なり加熱保持時間が長いため、850℃という若干低い温度でも必要な表面硬さを得ることはできたが、同じ供試材を高周波焼入した場合に比べ寿命が劣るものである。これは、加熱される範囲の違いに

よって起きる表面及び内部の応力値の差によるものと推察される。

【0045】以上説明した比較例に対し、本発明に該当する試験No.1~8 は、高周波焼入によって焼割れが発生することがなく、HRC 61.0以上の軸受鋼として十分な表面硬さが得られ、転動疲労性も従来鋼に比べ著しく優れていることがわかる。また、本発明のうちMoを積極添加した鋼を供試材として試験した試験No.7,8では、特に優れた転動疲労寿命を示すことが確認できた。

【0046】

【発明の効果】以上説明した通り、本発明に係る転動疲労性に優れた高周波焼入用軸受鋼は、その合金成分、高周波焼入条件を規定することによって、従来鋼と同等の焼入硬さ、製造性を有しつつ、非常に優れた転動疲労性を有する。高周波焼入のため、通常焼入や浸炭焼入に比べて、焼入ひずみや脱炭が少なく、また、広い範囲の部品サイズに適用が可能となるので、省エネルギー、工程時間短縮等に効果を発揮できる。そればかりか、軸受鋼の基本性能である転動疲労性が優れているので、軸受はもとより、それを使用する機械の高性能化に対しても大きく寄与する。